



УДК 620.91

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ
ЭФФЕКТИВНОСТИ, АДЕКВАТНОЙ СТАНДАРТНОМУ СОЛНЕЧНОМУ
ИЗЛУЧЕНИЮ****Харченко Валерий Владимирович**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

Никитин Борис Андреевич

кандидат технических наук

Панченко Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник
Российский университет транспорта МИИТ, Москва,
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

Тихонов Павел Валентинович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

Аннотация

В работе рассмотрена экспериментальная оценка спектральных значений эффективностей фотоэлектрических преобразователей. Представлены спектральные зависимости токовых фотооткликов эталонного кремниевого фотопреобразователя. Проведено сопоставление спектральных плотностей токовых фотооткликов кремниевых эталонного и исследуемого фотопреобразователей при засветке от лабораторного источника света. Также в статье определены спектральные значения коэффициента полезного действия фотопреобразователя. Используя рассмотренные положения, можно получить информацию о соответствующих значениях эффективностей фотоэлектрических преобразователей для определённых длин волн монохроматического излучения.

Ключевые слова: солнечная энергетика, эффективность, фотоэлектрические преобразователи, спектральная плотность, длина волны.

RESEARCH OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PHOTO CONVERTERS WITH THE PURPOSE OF DETERMINING THEIR EFFICIENCY ADEQUATE TO STANDARD SOLAR RADIATION

Valeriy V. Kharchenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

Boris A. Nikitin

Candidate of Technical Sciences

Vladimir A. Panchenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher
Russian University of Transport, Moscow,
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

Pavel V. Tikhonov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

ABSTRACT

The paper considers an experimental estimation of the spectral values of the efficiencies of photoelectric converters. Spectral dependences of current photoresponders of a reference silicon photoconverter are presented. A comparison is made of the spectral densities of the current photoresponders of silicon reference and studied photoconverters under exposure from a laboratory light source. The article also defines the spectral values of the efficiency of the photoconverter. Using the considered provisions, it is possible to obtain information on the corresponding values of the efficiencies of photoelectric converters for specific wavelengths of monochromatic radiation.

Keywords: solar energy, efficiency, photoelectric converters, spectral density, wavelength.

Экспериментальная оценка спектральных значений эффективностей фотопреобразователей является весьма актуальной задачей. По характеру этой зависимости можно получить информацию о соответствующих значениях эффективности исследуемого преобразователя для определённых длин волн монохроматического излучения, а также позволяет вычислить реальное значение эффективности фотопреобразователя для наперед заданного спектра излучения, в том числе и для стандартного солнечного излучения АМ 1,5 [1 - 7].

Решение поставленных задач представляется возможным путем сопоставления токовых спектральных (с помощью специально подобранных светофильтров) фотооткликов эталонного и исследуемого фотопреобразователей. Эталонным фотопреобразователем следует считать полупроводниковый преобразователь, тарированный в области фотоактивной части для данного полупроводника стандартного солнечного излучения в виде величины спектральных плотностей токов короткого замыкания преобразователя.

Предварительным условием планируемого анализа является настройка используемого оборудования с целью обеспечения равенства интегральных (без использования светофильтров) токов короткого замыкания эталонного преобразователя от стандартного солнечного излучения и от лабораторного источника света. Сопоставление спектральных (с помощью светофильтров) токовых фотооткликов эталонного преобразователя от двух сравниваемых источников света даёт представление о величинах спектральных усредненных (по ширине полосы пропускания выбранного светофильтра) мощностях монохроматической линии используемого лабораторного источника света. На рисунке 1 представлены спектральные зависимости токовых фотооткликов эталонного кремниевого фотопреобразователя при освещении последнего стандартным солнечным излучением (ССИ) АМ 1,5 (согласно паспортным данным тарирования этого преобразователя) и при освещенности от лабораторного источника света (галогенной лампы накаливания).

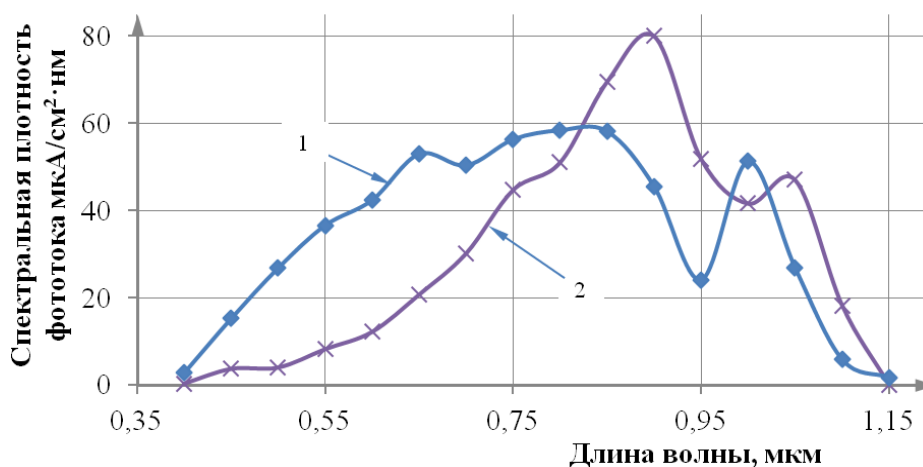


Рисунок 1. Сопоставление спектральных плотностей токовых фотооткликов эталонного кремниевого фотоэлектрического преобразователя при засветке стандартным солнечным излучением АМ 1,5 (кривая 1) и лабораторным источником света (галогенная лампа с водяным светофильтром $h=42$ мм.) (кривая 2) при равных интегральных токах короткого замыкания

Из анализа этих зависимостей следует, что спектр лабораторного источника света обеднен интенсивностью световых потоков в коротковолновой его части, однако отличается повышенной интенсивностью в длинноволновой части. Площади, ограниченные этими зависимостями равновелики, поскольку у них интегральные значения токов короткого замыкания равны.

На рисунке 2 представлены усредненные спектральные плотности мощностей световых полос (шириной 50 нм в соответствии с тарированием эталонного преобразователя) фотоактивной части (для Si) спектра ССИ АМ 1,5. Также на нём приведены численные значения мощностей световых потоков каждой такой полосы. На рисунке 2 представлены значения $\Delta P'_{\lambda i AM 1,5}$ стандартного солнечного излучения АМ 1,5, полученные путем деления его фотоактивной для S_i части спектра на полосы, шириной 50 нм.

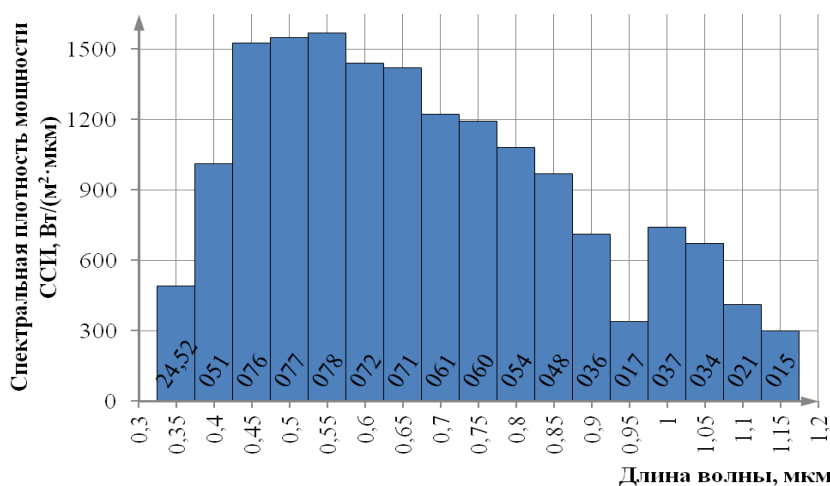


Рисунок 2. Усреднённые спектральные плотности мощностей полос шириной 50 нм ССИ AM 1,5 фотоактивной части спектра для кремния (численные спектральные плотности мощностей световых полос показаны выше оси абсциссы и имеют размерность Вт/м²)

Данные рисунков 1 и 2 позволяют определить мощности световых полос использованного лабораторного источника света для каждой выделенной длины волны.

На рисунке 3 представлены экспериментально снятые спектральные зависимости токовых фотооткликов двух разных фотопреобразователей (эталонного фотопреобразователя и исследуемого) при одном и том же уровне и спектре освещённости от лабораторного источника света. Из анализа рисунка следует, что в силу индивидуальных особенностей конструкции и технологии изготовления фотопреобразователей эти зависимости не идентичны. Сопоставление фотооткликов преобразователей позволяет определить для исследуемого образца фотопреобразователя токовый фотоотклик, приходящийся на единицу мощности светового тока для заданной длины волны спектра.

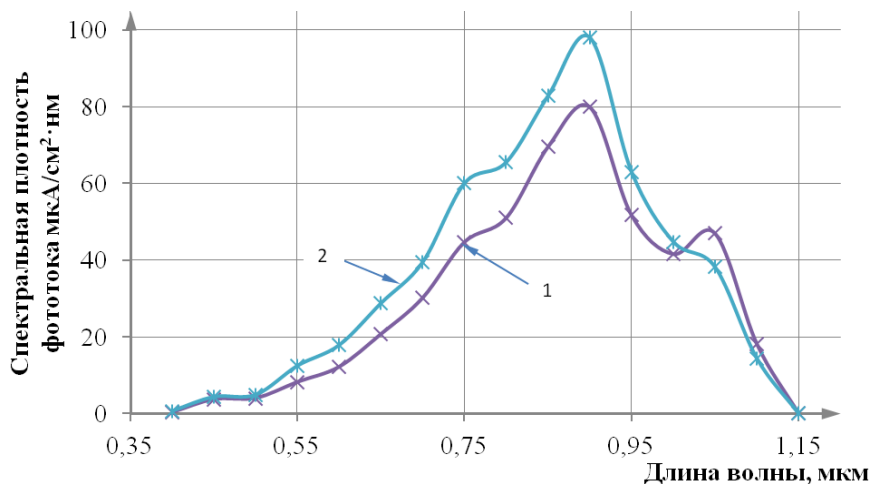


Рисунок 3. Сопоставление спектральных плотностей токовых фотооткликов кремниевых эталонного (кривая 1) и исследуемого (кривая 2) фотопреобразователей при засветке от лабораторного источника света

Вольтамперная характеристика (ВАХ) исследуемого преобразователя, снятая традиционным методом при освещённости от используемого лабораторного источника света (естественно отличающегося по спектру от стандартного солнечного излучения), содержит в себе важные для дальнейших расчетов данные:

1) Ток короткого замыкания преобразователя (интегральный) I_0 , который можно представить как сумму вкладов всех монохроматических линий используемого лабораторного источника света. То же самое можно сказать и о стандартном солнечном излучении, поскольку токи короткого замыкания равновелики согласно изложенному выше.

2) Максимальная мощность фотопреобразователя P_{max} .

Согласно общеизвестному определению коэффициент полезного действия преобразователя равен отношению полезной мощности ко всей затраченной мощности полного светового потока. В нашем случае под полезной мощностью фотопреобразователя следует принять максимальную мощность, снимаемую с преобразователя согласно снятой ВАХ. Следует отметить что характер (форма) ВАХ преобразователя не должен меняться, если световые потоки одних линий мысленно заменить эквивалентными по токовому фотоотклику других линий, стало быть, и положение рабочей точки на ВАХ не изменится. Это обстоятельство обусловлено тем, что подвижные носители зарядов (первую очередь электроны) по кинетической энергии, получаемой при поглощении высокоэнергичных фотонов, практически мгновенно термолизуются согласно тезису, изложенному в работе [8]. Это обстоятельство делает эти подвижные носители зарядов неотличимыми по истории своего происхождения.

В соответствии с выше изложенным, мощность монохроматического излучения с длиной волны λ_i , генерирующая полный ток короткого замыкания I_0 , определится выражением:

$$P_{\lambda_i} = \Delta P'_{\lambda_i AM1,5} \cdot S_{ФЭП} \cdot \frac{i'_{\lambda_i \text{ лаб.эт}}}{i'_{\lambda_i AM1,5 \text{ эт}}} \cdot \frac{I_0}{i'_{\lambda_i \text{ лаб.ФЭП}} \cdot S_{ФЭП} \cdot \Delta \lambda_{тарир}}, \quad (1)$$

где: $\Delta P'_{\lambda_i AM1,5}$ – плотности мощностей световых потоков стандартного солнечного излучения АМ 1,5 с длиной волны λ_i шириной полосы 50 нм, как обычно осуществляют тарирование эталонного преобразователя и подбираются светофильтры;

$S_{ФЭП}$ – площадь исследуемого фотоэлектрического преобразователя;

$i'_{\lambda_i \text{ лаб.эт}}$ – спектральная плотность тока короткого замыкания эталонного преобразователя от лабораторного источника света на длине волны λ_i ;

$i'_{\lambda_i AM1,5 \text{ эт}}$ – спектральная плотность тока короткого замыкания эталонного преобразователя от солнечного излучения АМ 1,5 на длине волны λ_i ;

I_0 – ток короткого замыкания исследуемого фотопреобразователя согласно снятой ВАХ;

$i'_{\lambda_i \text{ лаб.ФЭП}}$ – спектральная плотность тока короткого замыкания исследуемого фотопреобразователя в условиях освещённости от лабораторного источника света на длине волны λ_i ;

$\Delta \lambda_{тарир}$ – шаг проведённого тарирования эталонного фотопреобразователя (обычно 50 нм).

Спектральные значения коэффициента полезного действия (КПД) исследуемого фотопреобразователя определяются согласно выражению:

$$КПД_{\lambda_i} = \frac{P_{max \text{ ФЭП}}}{P_{\lambda_i}}, \quad (2)$$

где $P_{max \text{ ФЭП}}$ – максимальная мощность, снимаемая с фотопреобразователя, рассчитываемая по его ВАХ, снятой в условиях освещённости от лабораторного источника света, настроенного под стандартное солнечное излучение по интегральному значению тока короткого замыкания I_0 с помощью эталонного фотопреобразователя;

P_{λ_i} – мощность монохроматического излучения с длиной волны λ_i , обуславливающего получение с исследуемого фотопреобразователя той же величины тока короткого замыкания I_0 , которое соответствует ВАХ. Величина такой мощности определена выражением 1.

На рисунке 4 представлена зависимость КПД исследуемого серийного кремниевого преобразователя [9, 10] от длины волны. Из анализа полученной зависимости следует, что $KПД_{\lambda_i}$ с ростом длины волны плавно возрастает от нуля (при $\lambda_i = 0,4$ мкм) до 40 % при $\lambda_i = 0,95$ мкм. Почти нулевое значение $KПД_{\lambda_i}$ наблюдается в условиях, когда фотоны соответствующей (малой) длины волны полностью поглощаются легированным слоем преобразователя без разделения $p-n$ – переходом электронно-дырочных пар.

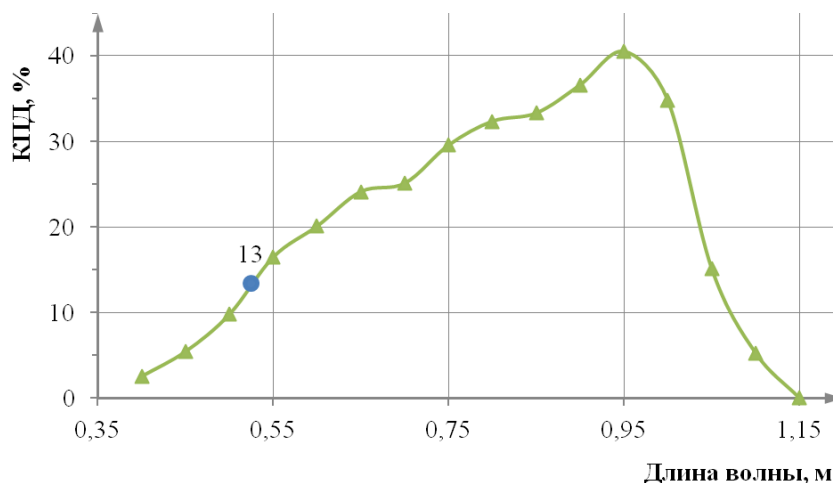


Рисунок 4. Характерный вид спектральных значений КПД кремниевых ФЭП

На основе полученной экспериментально снятой спектральной зависимости КПД фотопреобразователя представляется возможным определение обобщенного КПД ФЭП для наперед заданного спектра излучения. Обобщенное КПД фотопреобразователя можно представить в виде суммы парциальных вкладов $KПД_{\lambda_i}$ для каждой полосы заданного спектра с учётом долевой части этих полос в мощности полного светового потока излучения. Обобщенное КПД фотопреобразователя, как адекватное для заданного спектра излучения, описывается выражением:

$$\hat{E} \ddot{A}_{\hat{a}} = \sum K_{\lambda_i} \cdot \hat{E} \ddot{A}_{\lambda_i}, \quad (3)$$

где $KПД_{\lambda_i}$ – спектральные значения КПД исследуемого фотопреобразователя, полученные согласно выражению 2;

K_{λ_i} – доля мощности светового потока длиной волны λ_i в полной мощности светового потока заданного спектра.

КПД фотопреобразователя, адекватное стандартному солнечному излучению АМ 1,5 (1000 Вт/м²), рассчитанное согласно выражению 3 на рисунке 4 представлено в виде знака “точки” со значением 13, размещенного на спектральной кривой зависимости $KПД_{\lambda_i}$ от λ_i .

Благодаря рассмотренной методике появляется возможность экспериментальной оценки спектральных значений эффективностей фотопреобразователей. Используя рассмотренные положения, можно получить информацию о соответствующих значениях эффективностей фотоэлектрических преобразователей для определённых длин волн монохроматического излучения. Также возможно вычисление эффективности фотопреобразователя для заданного спектра излучения.

Список литературы

1. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets // Solar Energy, V.30, №6, 1983, p. 563-573.
2. Никитин Б.А., Гусаров В.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью 1000 Вт/м² и оценка на его основе ожидаемых характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика, М.: НПП "Квант", №24-25, 2008-2009 гг., с. 50-60.
3. Никитин Б.А., Майоров В.А., Харченко В.В. Исследование спектральных характеристик солнечного излучения для различных величин атмосферных масс // Вестник ВИЭСХ, 2015, № 4 (21), с. 95-105.
4. Никитин Б.А., Майоров В.А., Харченко В.В. Влияние величины атмосферной массы на спектральную интенсивность солнечного излучения // Энергетика и автоматика, 2015, № 4 (26), с. 54-65.
5. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V., Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 866, 2019, p. 328-336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_34.
6. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Theoretical method of estimation and prediction of PV cells parameters // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология", 2012, № 4 (108), с. 74-78.
7. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Estimation and forecasting of PV cells and modules parameters on the basis of the analysis of interaction of a sunlight with a solar cell material // Conference Proceeding - 4th International Conference, TAE 2010, p. 307-310.
8. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества, UNESCO-BRESCE 2007, М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007, 292 с.
9. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 - 29.
10. Панченко В.А. Солнечные модули Федерального научного агроинженерного центра ВИМ различных типов и конструкций для автономного энергоснабжения // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017, с. 1030 - 1033.

References

1. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets. Solar Energy, V.30, №6, 1983, p. 563-573.
2. Nikitin B.A., Gusarov V.A. Analysis of the standard spectrum of terrestrial solar radiation with an intensity of 1000 W/m² and assessment based on it of the expected characteristics of silicon photovoltaic converters // Autonomous Power Engineering: Technical Progress and Economics, Moscow: NPP Kvant, No. 24-25, 2008-2009, p. 50-60 [in Russian].
3. Nikitin B.A., Mayorov V.A., Kharchenko V.V. Investigation of the spectral characteristics of solar radiation for various atmospheric masses. Vestnik VIESH, 2015, No. 4 (21), p. 95-105 [in Russian].
4. Nikitin B.A., Mayorov V.A., Kharchenko V.V. The effect of atmospheric mass on the spectral intensity of solar radiation. Energy and Automation, 2015, No. 4 (26), p. 54-65 [in Russian].
5. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V., Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent

Systems and Computing, Volume 866, 2019, p. 328-336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_34.

6. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Theoretical method of estimation and prediction of PV cells parameters // International scientific journal "Alternative Energy and Ecology", 2012, № 4 (108), p. 74-78.
7. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Estimation and forecasting of PV cells and modules parameters on the basis of the analysis of interaction of a sunlight with a solar cell material // Conference Proceeding - 4th International Conference, TAE 2010, p. 307-310.
8. Arbuzov Yu.D., Evdokimov V.M. Fundamentals of photoelectricity, UNESCO-BRESCE 2007, M.: GNU VIESH, 2007, 292 p.
9. Panchenko V.A. Review and application of solar modules developed and manufactured by GNU VIESH // Bulletin of VIESH, 2014, No. 4 (17), p. 20 - 29.
10. Panchenko V.A. Solar Modules of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM of various types and designs for autonomous energy supply // Ecological, industrial and energy safety - 2017, p. 1030 - 1033.